

## РЕДУКЦИОННО-РАСТЯЖНОЙ СТАН ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ТРУБ В ЛИНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЕССА

### REDUCING-STRETCHING THE HOT MILL PIPE IN THE LINE HORIZONTAL HYDRAULIC PRESS

Буркин С.П., Исхаков Р.Ф.

Уральский федеральный университет, г.Екатеринбург, spb@mtf.ustu.ru

Considered technological version of the direct combination of compression and reduction rolling tube to almost final size at which the pipe is subjected to intensive cooling. This option involves rolling extrusion heat. This eliminates all the known shortcomings of traditional technology. Hot rolling reduces the energy consumption for plastic deformation. The continuous reduction rolling press in lines align the performance of these processes. After pressing the chemical treatment is required to remove oxides. Eliminates the need for an intermediate heat treatment. Proposed to use the hydraulic roll reducing mill, and introduced the concept of automatic speed coordination pressing and rolling.

Keywords: tube manufacture, pressing, rolling Reduction, speed coordination, hydraulic drive

Технологический цикл изготовления холоднодеформированных труб, в частности из тяжелых цветных металлов, содержит большое число переделов как горячей, так и холодной пластической обработки. Горячепрессованная труба после травления поступает либо на холодную прокатку труб, либо на многопроходное волочение. Лишь медные трубы могут пройти всю холодную деформацию без промежуточной термообработки, которая сопровождается, как правило, окислением поверхности и требует последующей химической обработки.

Как холодная деформация, так и промежуточная термообработка повышают удельное энергопотребление и себестоимость продукции. Многопроходное волочение является трудоемким процессом с низкой производительностью. Кроме того, несовершенство применяемых волочильных машин с элеваторной передачей бухт порождает дополнительные поверхностные дефекты, не устраняемые последним чистовым проходом.

Вполне естественным представляется технологический вариант прямого совмещения прессования и прокатки трубы до почти готового размера, на котором труба подвергается интенсивному охлаждению. Этот вариант предполагает применение горячей редуцирующей прокатки с прессовым нагревом. При этом

устраняются все перечисленные недостатки традиционных схем производства труб. Во-первых, горячая деформация резко снижает энергозатраты на пластическое формоизменение металла, поскольку сопротивление горячей деформации на порядок ниже, чем при холодной. Во-вторых, непрерывная прокатка в линии прессования выравнивает производительность этих переделов. В-третьих, после прессования не требуется химическая обработка трубы для удаления окислов и окалины. В-четвертых, для любых медных сплавов отпадает необходимость в промежуточных термообработках, поскольку металл трубы при обработке до предчистового размера находится при температуре выше рекристаллизационной. В-пятых, появляется просто реализуемая возможность интенсивного охлаждения горячекатаной трубы на выходе из редуцирующего стана, что позволяет избавиться от необходимости химической обработки перед чистовым волочильным проходом. И последнее, чистовой волочильный проход с регламентированным обжатием гарантирует обеспечение требуемого уровня механических свойств металла; при этом вполне вероятно уменьшение анизотропии механических характеристик и повышение прочности труб в тангенциальном направлении.

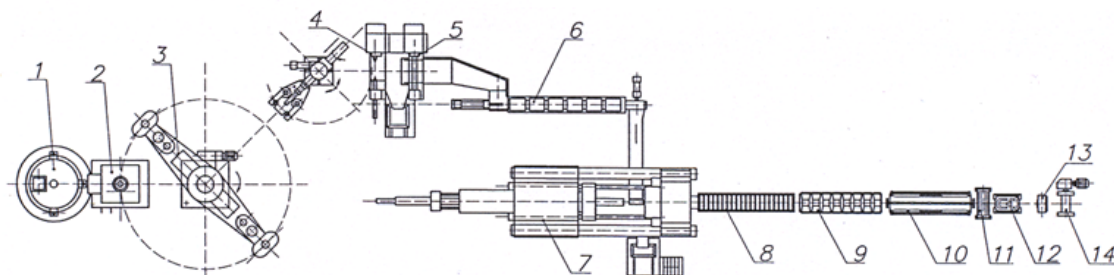


Рис. 1. Технологический план участка производства цельнокатаных или цельнотянутых медных труб: 1 – плавильная индукционная печь; 2 – дополнительная емкость для формирования полой прессовой заготовки намораживанием; 3 – передаточное устройство карусельного типа; 4 – агрегат механической обработки прессовых заготовок; 5 – пила обрезки концевых частей слитка; 6 – проходная индукционная печь; 7 – горизонтальный гидравлический трубо-профильный пресс; 8 – редуцирующий стан; 9 – линия ускоренного охлаждения; 10 – петлевое устройство; 11 – пила обрезки переднего конца трубы; 12 – радиально-ковочная машина; 13 – раскладчик с волокодержателем; 14 – моталка

В плане реализации технологии совмещения прессования с прокаткой труб наиболее рациональной представляется схема, приведенная на рис. 1 и являющаяся одним из вариантов технологического плана участка производства цельнотянутых труб из медных сплавов.

Компоновка и состав оборудования могут быть сохранены в случае организации производства труб из других металлов и сплавов. Свойства конкретного сплава отражаются на режимах обработки и на производительности технологической линии.

Плавка металла осуществляется в индукционной печи 1, в частности в индукционном плавильном агрегате с магнитным перемешивателем. Плавильный агрегат посредством металлопровода соединен с дополнительной емкостью 2, в которой осуществляется формирование полой прессовой заготовки намораживанием на изготовленную из той же марки, что и выплавляемый сплав трубу-кристаллизатор. В состав оборудования плавильно-литейного агрегата входит передаточное карусельное устройство 3, которое выполняет функции подачи труб-кристаллизаторов в дополнительную емкость, подачи охлаждающего реагента внутрь кристаллизатора, вытягивания слитка сквозь калибровочное кольцо, передачи слитков на участок механической обработки. Удерживаемый манипулятором слиток подается на отрезной станок 5, где отрезаются его концевые части. Далее он устанавливается в центры токарного станка 4 для горячей обточки наружной поверхности слитка. Без промежуточного охлаждения, механически обработанные полые прессовые заготовки поступают в проходную индукционную печь 6 для подогрева и выравнивания температуры по объему. Печь снабжена осевым толкателем, с помощью которого нагретые заготовки передаются в устройство подачи слитков горизонтального гидравлического пресса. Если используется короткий слиток ( $L/D \leq 3,5$ ), то применяется обычный трубо-профильный пресс 7 с независимой прошивной системой. Если же формируются длинномерные заготовки, то пресс реконструируется под полунепрерывное обратное прессование из разъемного контейнера. В последнем случае реализуется прессование с обратным истечением и последовательной подачей слитков на жестко закрепленную по оси пресса оправку. Плоскоовальная форма придается сечению литой полой заготовки фрезерованием лысок на участке механической обработки. При вводе очередного удлиненного слитка стыкующиеся торцы заготовок обрабатываются иглофрезами, а прижатие очередной заготовки к торцу предыдущей осуществляется дополнительным толкателем. В момент начала прессования включаются приводы всех клеток редуционного стана с расчетными передаточными числами. При известной вытяжке

во время прессования скорость первой клетки редуционного стана задается, исходя из расхода рабочей жидкости главного плунжера пресса.

Прессуемая труба по проводковому устройству направляется в валки редуционно-растяжного стана 8, настроенного на прокатку в первой клетки с задним натяжением и регламентированными межклетевыми натяжениями. За счет такой настройки прессование проводится с передним натяжением, что разгружает главный привод пресса и снижает контактные давления в калибрующей зоне матрицы. Проходя зону ускоренного охлаждения 9 и направляющие петлевого устройства 10, передний конец трубы тормозится на входе участка волочения. После остановки переднего конца труба накапливается на барабанах петлевого устройства. На волочильном участке последовательно выполняются операции удаления переднего конца трубы пилой 11, впрыскивания смазки в полость трубы, ввода плавающей оправки, заковки переднего конца в радиально-ковочной машине 12 и закрепление захватки на приемном барабане моталки 14. Труба, принимаемая моталкой, проходит через разведенные бойки радиально-ковочной машины 12 и направляющие устройства раскладки 13. После включения привода моталки осуществляется волочение катаной трубы, снимаемой с барабанов петлевого устройства. Если к моменту начала волочения прессование не закончено, то прием трубы на барабаны петлевого устройства и ее съем осуществляются одновременно. Процесс завершается формированием регулярного тела намотки. После обвязки бухта цельнотянутой трубы снимается со шпинделя моталки.

В приведенной схеме производства труб используется 20-клетевой редуционно-растяжной непрерывный стан горячей прокатки. Его основное назначение – получение тонкостенных труб небольших диаметров. Эти станы работают с натяжением, при этом толщина стенки утоняется или сохраняется неизменной в зависимости от применяемой степени натяжения. Можно отметить, что если прокатка в редуционно-калибровочных станах обычно несколько снижает точность по толщине стенки готовых труб, то при прокатке в редуционно-растяжных станах, наоборот, поперечная разностенность уменьшается. Редуцирование с натяжением приводит к образованию утолщенных концов труб, которые в дальнейшем должны быть отрезаны. Чем больше степень редуцирования (она может достигать 75...80 %) и чем больше применяемое натяжение, тем больше увеличиваются длина и масса этих концов. Поэтому считается экономически оправданным применение этих станов, когда исходная труба имеет длину не менее 15...20 м.

Станы продольной безоправочной прокатки могут иметь клетки с двумя или тремя валками. Четырехвалковые клетки практически не применяют из-за сложности их конструкции.

Двухвалковые клетки современной конструкции имеют двухопорное крепление валков, что позволяет их применять в случаях, когда радиальные усилия на валки наиболее значительны (это относится, прежде всего, к случаям прокатки толстостенных труб).

Станы с трехвалковыми клетями получили в последние годы большое распространение. Преимущество трехвалковых клетей заключается в том, что они обеспечивают более высокую точность труб по толщине стенки. И хотя количественно этот факт не имеет экспериментального подтверждения, но сам по себе не вызывает сомнения. Другое достоинство трехвалковых клетей заключается в том, что приводные валы во всех клетях можно располагать горизонтально (в двухвалковых – под углом  $45^\circ$ ), а привод – по одну сторону от оси прокатки, что облегчает обслуживание стана.

Привод рабочих клетей станов продольной безопрывочной прокатки несет важную технологическую функцию: тип привода в значительной мере предопределяет возможный режим натяжения как в установившемся процессе, так и в переходный период. В этой связи привод станов весьма разнообразен. Принципиально его можно разделить на три вида: групповой, индивидуальный и комбинированный (дифференциально-индивидуальный и дифференциально-групповой).

Наиболее простым является групповой привод: от одного двигателя приводятся валки всех клетей, для чего используют, например, редукторы с коническими передачами. При таком приводе изменять величину натяжения нельзя и прокатку осуществляют с режимом натяжения, характерным для каждого конкретного стана. Групповой привод использовали в старых калибровочных и редуционных станах. В настоящее время он не имеет особого применения. Создание таких станов может быть оправдано только в тех случаях, когда предполагают получать очень узкий сортамент труб.

Второй вид привода - индивидуальный. Это универсальный вид привода, пригодный как для редуционно-калибровочных, так и для редуционно-растяжных станов.

Станы с индивидуальным приводом валков позволяют осуществлять прокатку без натяжения или с заданным натяжением. Такие станы обеспечивают регулировку скоростей валков и натяжение в широких пределах.

Калибровочные и редуционные станы продольной прокатки весьма разнообразны по конструкции: двухвалковые станы, предназначенные для редуцирования труб широкого сортамента, имеют индивидуальный привод. Различие заключается в том, что в одном из них применены наклонно расположенные двигатели и понижающие редукторы с цилиндрическими шестернями. Другой стан имеет горизонтальные двигатели, но в этом случае в редукторах применяют конические передачи. Поскольку эти станы не используют для

прокатки с большим натяжением, то расстояние между клетями можно иметь достаточно большим, а двигатели расположить на каждую сторону от оси прокатки в одну линию.

В редуционно-растяжных станах расстояние между клетями доведено до минимально возможной величины и поэтому двигатели приходится располагать в два ряда с обеих сторон стана.

При проектировании редуционного стана всегда стремятся к минимальному шагу рабочих клетей. Это требование имеет особое значение при редуцировании штучных труб, поскольку в этом случае длина и масса утолщенных концов, существенно влияющих на расходный коэффициент металла на агрегате в целом, зависят от шага клетей. Шаг клетей зависит, прежде всего, от диаметра рабочих валков и от компоновки привода стана [1].

Формоизменение металла при прокатке трубы в круглом калибре без оправки сопровождается неравномерным распределением радиальных, тангенциальных и осевых напряжений по сечению трубы вдоль очага деформации. Значительные тангенциальные сжимающие напряжения приводят к уменьшению размеров трубы в тангенциальном направлении и к увеличению в осевом и радиальном. Радиальная деформация развивается внутрь трубы, т.е. происходит утолщение стенки трубы [2].

При малых обжатиях трубы по диаметру (степенях редуцирования) сопротивление продольному истечению металла оказывается больше сопротивления истечению внутрь трубы, что вызывает утолщение стенки. С ростом величины деформации интенсивность утолщения стенки возрастает. Но, вместе с тем, возрастает и сопротивление истечению металла внутрь трубы. При определенной величине редуцирования утолщение стенки достигает своего максимума, и последующее увеличение степени редуцирования приводит к более интенсивному росту сопротивления истечения внутрь и увеличению продольной вытяжки, в связи с чем утолщение стенки уменьшается.

Изменение диаметра трубы определяется размерами калибра, в то время как изменение толщины стенки зависит от многих факторов: степени редуцирования, исходной толщины стенки и диаметра трубы, величины натяжения и др. При редуцировании без натяжения толщина стенки трубы, как правило, увеличивается [3].

Утолщение стенки на трех- и четырехвалковых станах происходит несколько в меньшей степени, причем стенка по периметру трубы получается более равномерной, чем на станах с двухвалковыми клетями [4].

Из обзора конструкций редуционных станов и технологических особенностей редуционно-растяжной прокатки следует, что при разработке новой конструкции стана, устанавливаемого, например, в линии прессования, необходимо предельно сократить межклетевое

расстояние, упростить конструкцию самих клеток и способ перевалки стана, усовершенствовать систему скоростного автоматического согласования клеток. Описание конструкций клеток современных редукционных станов показывает, что четырехвалковые клетки не применяют из-за сложности конструктивного исполнения и практической невозможности использовать двухопорную установку валков. Консольные валки неминуемо понижают жесткость клетки и, следовательно, точность размеров прокатываемых труб. В тоже время увеличение количества валков снижает поперечную разностенность труб, повышает устойчивость профиля при прокатке тонкостенных труб. Следовательно, удачное конструктивное решение четырехвалковой клетки позволит усовершенствовать редукционную прокатку. Установка высокомоментных гидромоторов, например, роliko-лопастного типа, существенно упрощает привод клетки. Безредукторные клетки с индивидуальным гидроприводом рабочих валков компактны, имеют малую металлоемкость, просты конструктивно, обладают высокой жесткостью даже при консольной установке валков.

Конструктивная схема установки рабочих валков и гидромоторов их привода приведена на рис. 2. Корпус клетки 1 выполнен монолитным с пазами для установки четырех консольных конических валков 2 и с четырьмя боковыми расточками для помещения валкового узла с гидромоторами 3. Валки закрепляются на оси 4 с помощью штифтов и осевой стяжной шпильки 5. Подшипники 6 и смазочный коллектор 7 помещены в гильзу 8, установленную с возможностью осевого перемещения в расточке корпуса. На выходной стороне валкового узла ось 4 посредством шлицевого соединения сопрягается с валом гидромотора 3. Последний жестко закреплен на фланце 9, который притягивается болтами 10 к корпусу 1, смещая в осевом направлении как гильзу 8 вместе с валком 2, так и гидромотор 3. На конической части валков 2 после сборки клетки фрезой нарезается предписанный калибровкой круглый калибр. Поскольку в круглом калибре обжимных редукционных клеток предусматривается регламентированный эксцентриситет радиальной поверхности калибра, гильзы 8 являются эксцентричными и позволяют при их повороте специальным механизмом (на схеме не показан) в расточках корпуса осуществлять радиальное смещение валкового узла. После расточки калибра обратным разворотом гильз 8 устанавливается требуемый раствор валков.

Рабочие валки клетки не имеют механической связи, а их скоростное согласование достигается за счет многопоточных делителей и сумматоров потоков рабочей жидкости.

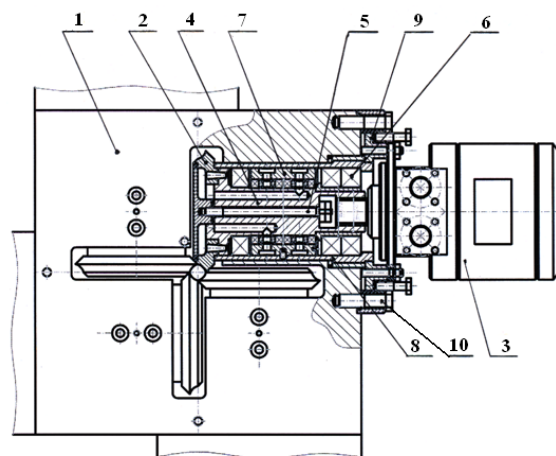


Рис. 2. Конструктивная схема четырехвалковой редукционной клетки с гидроприводом:  
1—корпус клетки; 2—валок; 3—гидромотор; 4—ось валка; 5—стяжная шпилька; 6—подшипник;  
7—смазочный коллектор; 8—гильза валкового узла;  
9—установочный фланец;  
10—регулирующий болт

Клетки помещаются осевыми цапфами в расточки станины стана с возможностью осевого разворота и фиксации в произвольном угловом положении, что особенно важно в случае использования конических валков, порождающих скручивание прокатываемой трубы при прокатке. Угол закручивания определяется величиной обжатия трубы.

Повышенная жесткость клетки обеспечивается цельным корпусом, эксцентриковой системой радиальной регулировки калибра и применением конических валков. Вектор полного давления металла на валок направлен под углом  $45^\circ$  к оси валка, поэтому лишь половина нагрузки воздействует на ось вала в поперечном направлении.

Перевалка редукционного стана осуществляется клетями без особых затруднений, поскольку быстроразъемные гидромуфты являются серийно выпускаемыми изделиями вполне надежными в эксплуатации. Смена валков в клетях производится после демонтажа гидромотора и стяжной шпильки. С помощью фланца 9 гильза 8 вытягивается из корпуса 1, освобождая валок 2, который извлекается из продольного паза.

Возможна установка корпусов клеток вплотную друг другу с минимальным межклетевым расстоянием.

Важным достоинством гидропривода валков является отсутствие асимметрии очага деформации при многовалковой прокатке, что исключает изгиб трубы на выходе из клетки и позволяет обходиться без проводковых устройств в межклетевых промежутках.

Для описанных здесь клеток редукционно-растяжного стана разработана оригинальная конструкция гидромотора роliko-лопастного типа, реализующая принцип работы гидроповоротников и позволяющая развивать сравнительно большой крутящий момент, что требуется для

безредукторного привода клеток. На клетях стана, катающего горячепрессованную медную или латунную трубу, могут быть установлены гидромоторы ГМ-180 со следующими характеристиками:

- объем рабочей полости – 180 см<sup>3</sup>;
- крутящий момент при давлении рабочей жидкости 20 МПа – 565 Нм;
- расход рабочей жидкости при частоте вращения 100 об/мин – 18 л/мин;
- мощность при частоте вращения 100 об/мин – 5,9 кВт;
- максимальная частота вращения ротора – 1500 об/мин.

Конструкция гидромотора ГМ-180 со снятым корпусом и статором показана на рис. 3.

Надежность гидромотора ролико-лопастного типа, а именно стабильность скорости вращения при возможных изменениях крутящего момента во время прокатки, определяется объемом дренажного слива рабочей жидкости в зазоры между зубьями ротора и рабочей поверхностью статора. С изменением момента прокатки меняется давление жидкости в напорных полостях. Упругая раздача статора и радиальная деформация полого ротора определяют величину раскрытия зазоров и нарушение номинального соответствия между частотой вращения гидромотора (валков клетки) и расходом рабочей жидкости в напорной линии. С целью установления зависимости величины зазоров от рабочего давления при различных угловых положениях ротора выполнено решение упругой деформации системы статор-ротор методом конечных элементов. Результаты выполненного конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния деталей гидромотора при задании реальных геометрических параметров мотора ГМ180 и свойств реальных конструкционных материалов, из которых могут быть изготовлены статор и ротор, свидетельствуют, что в случае изготовления основных деталей мотора с регламентированной точностью объем дренажа при номинальном рабочем давлении в кольцевом канале статора соответствует нормам, установленным для гидромоторов поршневого типа.



Рис. 3. Гидромотор ГМ180 со снятым корпусом и статорным блоком

Скоростное согласование валков каждой клетки выполняется с помощью многопоточных делителей и сумматоров потоков [5]. Это гарантирует отсутствие люфтов и временного рассогласования валков, характерного для клеток с механическими элементами согласования.

На базе достаточно обширных литературных данных по теории и технологии редукционно-растяжной прокатки сформирована рациональная методика и создано ее программное сопровождение, позволяющие проектировать калибровку четырехвалковых редукционных клеток, определять кинематические и энергосиловые параметры и назначать режим межклетевых натяжений, обеспечивающий получение горячекатаной трубы с заданной толщиной стенки. В качестве примера выполнен расчет, результаты которого сведены в табл.1, калибровки и кинематических параметров прокатки горячепрессованной медной (М1) трубы со средним диаметром 42 мм и толщиной стенки 2,7 мм с получением заготовки под чистовое волочение со средним диаметром 8,34 мм и толщиной стенки 1,05 мм. После охлаждения и волочения на самоустанавливающей оправке получается труба диам.8х1мм. Если после горячей прокатки и охлаждения прочность трубы составляет 220-240 МПа, то после финишного волочения с вытяжкой  $1,25 \sigma_g = 340-350$  МПа [6].

Таблица 1

Результаты расчета калибровки редукционной прокатки труб из меди М1

№ клетки	$\varepsilon_\varnothing$ , %	$D_{cp}$ , мм	$a$ , мм	$b$ , мм	$R$ , мм	$e$ , мм	$z$	$s$ , мм	$\lambda$	$\lambda_\Sigma$
0	-	42,00	-	-	-	-	0,30	2,70	-	-
1	4,30	40,19	41,78	38,60	26,35	7,05	0,60	2,70	1,04	1,04
2	8,60	36,74	39,70	33,77	36,02	19,14	0,70	2,63	1,12	1,18
3	8,60	33,58	36,29	30,87	32,92	17,49	0,80	2,52	1,14	1,35
4	8,60	30,69	33,17	28,21	30,09	15,99	0,85	2,39	1,15	1,56
5	8,60	28,05	30,32	25,79	27,50	14,61	0,85	2,25	1,16	1,82
6	8,60	25,64	27,71	23,57	25,14	13,35	0,85	2,12	1,16	2,12
7	8,60	23,43	25,33	21,54	22,98	12,21	0,85	2,00	1,16	2,47
8	8,60	21,42	23,15	19,69	21,00	11,16	0,85	1,88	1,16	2,88
9	8,60	19,58	21,16	18,00	19,19	1,20	0,85	1,77	1,16	3,36



10	8,60	17,89	19,34	16,45	17,54	9,32	0,85	1,67	1,16	3,91
11	8,60	16,35	17,67	15,03	16,04	8,52	0,85	1,57	1,16	4,56
12	8,60	14,95	16,15	13,74	14,66	7,79	0,85	1,48	1,16	5,31
13	8,60	13,66	14,77	12,56	13,40	7,12	0,85	1,39	1,16	6,21
14	8,60	12,49	13,50	11,48	12,24	6,50	0,85	1,31	1,16	7,23
15	8,60	11,41	12,33	10,49	11,19	5,95	0,85	1,23	1,16	8,46
16	8,60	10,43	11,27	9,59	10,23	5,43	0,80	1,16	1,16	9,85
17	8,60	9,53	10,30	8,76	9,35	4,97	0,75	1,10	1,15	11,42
18	8,60	8,71	9,42	8,01	8,54	4,54	0,70	1,05	1,15	13,17
19	4,30	8,34	8,67	8,01	5,47	1,46	0,00	1,05	1,05	13,84
20	0,00	8,34	8,34	8,34	4,17	0,00	0,00	1,05	1	13,84

В табл. 1 приняты следующие обозначения:

$$\varepsilon_{\varnothing} = \frac{D_0 - D}{D_0} \cdot 100\% - \text{относительное обжатие по}$$

диаметру трубы;

$D_0$  и  $D$  - наружный диаметр трубы соответственно на входе и выходе калибра;

$$D_{\text{ср}} = \frac{D + d}{2} - \text{средний диаметр трубы после}$$

прохода;

$d$  - внутренний диаметр трубы после соответствующего прохода прокатки;  $a$  - диаметр описанной вокруг калибра окружности;  $b$  - диаметр вписанной в калибр окружности;  $R$  - радиус кривизны ручья калибра;

$z = q/\sigma_s$  - относительное межклетевое натяжение;  $q$  - напряжение межклетевого натяжения;  $\sigma_s$  - сопротивление деформации металла трубы между клетями с учетом динамического разупрочнения;  $S$  - толщина стенки трубы на выходе из соответствующей клетки ( $S$  нулевой клетки - толщина стенки горячепрессованной трубы);  $\lambda$  - вытяжка в соответствующем проходе;  $\lambda_{\Sigma}$  - суммарная вытяжка после соответствующего прохода.

Расчет энергосиловых параметров выполнен при исходных данных: температура на входе в первую клетку - 900°C; скорость истечения при прессовании - 0,133 м/с; сопротивление деформации меди с учетом динамического разупрочнения при прессовании - 30 МПа.

Температура при редуционной прокатке определялась по формуле А.И.Целикова [4]. В паузах между проходами динамическое разупрочнение металла не учитывалось. Скорость деформации по проходам рассчитывалась по формуле

$$\xi_{\text{ср}} = \frac{\frac{\Delta D}{D} \cdot V \cdot B}{\frac{s}{D} \cdot \left(1 - \frac{s}{D}\right) \cdot 3,07 \cdot l},$$

где  $\Delta D$  - обжатие трубы по диаметру;  $V$  - скорость выхода трубы из калибра;  $l$  - длина очага деформации;  $l = 1,77\sqrt{R_0 \Delta D}$ ;  $R_0$  - радиус бочки

валка;

$$B = 0,87 \frac{s}{D} \left(2 - \frac{s}{D}\right) + 0,9z^3 \frac{s}{D}.$$

Результаты расчета энергосиловых параметров приведены в табл.2.

Осуществление редуционно-растяжной прокатки в линии прессования затруднено сложностью скоростного согласования нестабильного по скорости истечения прессования с прокаткой, скорости которой определены назначенным режимом вытяжек и межклетевых натяжений.

В актуальные задачи автоматического управления процессами прямого совмещения прессования с редуционной прокаткой и самой непрерывной прокатки трубы на редуционном стане входят следующие:

- скоростное согласование прессования с прокаткой в условиях непрерывного изменения скорости истечения в цикле прессования;
- обеспечение переднего натяжения прессуемой трубы на заданном уровне;
- скоростное согласование в соответствии с расчетным режимом вытяжек всех клетей редуционного стана;
- автоматический ввод и поддержание на предписанном уровне межклетевых натяжений для обеспечения прогнозируемого формирования заданной толщины стенки трубы к концу прокатки;
- временное и скоростное согласование работы петлевого устройства и редуционного стана, состоящее в обеспечении своевременного включения и поддержания скорости привода петлеформирователя в течение всего процесса прокатки и накопления компенсационного объема катаной трубы;

- автоматическое срабатывание в соответствии с циклограммой всех механизмов поста подготовки к

чистовому волочению переднего конца катаной трубы.

Таблица 2

Энергосиловые параметры редукционной прокатки труб из меди М1

№ клетей	$D_k$ , мм	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$V$ , мм/с	$\varepsilon$ , %	$\xi$ , с <sup>-1</sup>	$\sigma_s$ , МПа	$P$ , кН	$M$ , Нм
0	-	-	133,00	-	-	35,00	-	-
1	197,35	13,49	139,38	4,721	0,56	35,00	0,37	18,85
2	197,83	14,10	146,07	10,33	0,95	38,00	0,90	98,08
3	197,20	16,01	165,29	11,11	1,21	45,00	0,73	98,03
4	197,19	18,30	188,85	11,79	1,53	48,00	0,47	71,11
5	195,14	21,39	218,51	12,05	1,88	52,00	0,35	71,41
6	196,78	24,46	251,94	12,05	2,27	53,00	0,31	60,28
7	198,17	28,51	295,74	12,13	2,79	53,00	0,32	58,78
8	199,14	33,23	346,40	12,13	3,40	57,00	0,29	53,19
9	200,24	38,75	406,18	12,13	4,15	58,00	0,26	45,19
10	201,19	45,19	475,90	12,13	5,05	60,00	0,24	39,59
11	201,77	52,65	556,01	12,22	6,20	65,00	0,25	40,18
12	202,50	61,39	650,68	12,22	7,56	67,00	0,22	34,20
13	202,98	71,61	760,71	12,22	9,22	69,00	0,20	29,97
14	203,60	83,59	890,68	12,22	11,24	70,00	0,18	25,04
15	205,17	96,93	1040,77	12,31	13,87	72,00	0,17	12,38
16	205,68	113,8	1226,02	12,04	16,59	74,00	0,17	8,26
17	2006,14	132,72	1431,87	11,64	19,50	78,00	0,22	4,25
18	206,41	153,96	1663,20	11,21	22,67	78,00	0,22	0,60
19	202,89	180,83	1920,18	4,77	15,19	70,00	0,05	0,93
20	200	180,83	1921,00	-	-	-	-	-

Известно, что скорость истечения прессизделия при использовании гидравлического привода не остается постоянной в течение цикла прессования и зависит от силы прессования и, следовательно, от давления рабочей жидкости в главном цилиндре прессы. На силу прессования оказывают влияние многочисленные технологические факторы, стабилизация которых либо трудна, либо невозможна.

Если прессуемая труба после выхода из матрицы сразу направляется в клетки редукционного стана, то скорость истечения металла должна быть равна скорости входа трубы в первую клетку стана. Чрезмерное натяжение трубы при завышенной скорости вращения валков приводит или к пластической деформации и даже к обрыву трубы, или к пробуксовке трубы в валках, что провоцирует налипание металла на рабочие поверхности калибров и ухудшение качества поверхности горячекатаных труб. Необходимо учитывать, в то же время, технологическую эффективность переднего натяжения прессизделия, проявляющуюся в уменьшении силы прессования и контактного давления прессуемого металла на калибрующую часть матрицы. Если скорость прокатки в первой клетки редукционного стана мала, то между прессом и станом образуется непрерывно растущая петля, которая, если и допустима по условиям пластичности

металла прессуемого профиля, требует применения системы автоматического регулирования ее длины. Рациональным следует считать такое управление скоростью прокатки в первой клетки стана, при котором поддерживается постоянное и регламентированное технологией натяжение трубы между прессом и станом.

По условиям прокатки на редукционно-растяжном стане необходимо поддержание заданного режима межклетевых натяжений трубы, гарантирующего получение готовой горячекатаной трубы с требуемой толщиной стенки. Следовательно, клетки стана настраиваются не только в соответствии с проектируемым режимом вытяжек, но и с заданными натяжениями трубы между клетями.

Механическая характеристика гидропривода может рассматриваться как идеально жесткая, если не учитывать сжимаемость рабочей жидкости. Это обстоятельство важно при разработке системы автоматизации привода клетки, поскольку позволяет не рассматривать работу системы в переходные периоды, в частности при входе горячепрессованной трубы в валки стана, когда крутящий момент на валах гидромоторов скачкообразно изменяется от момента холостого хода до момента прокатки.

Регулирование скорости вращения ротора гидромотора осуществляется простыми техническими средствами – дросселями или регуляторами расхода, в отличие от систем тиристорного или частотного управления электромеханическим приводом. В данной разработке для привода четырехвалковой редукционной клетки

используются четыре механически не связанных гидромотора  $M_{ij}$ , например, роliko-лопастного типа, в напорных линиях которых установлен четырехпоточный делитель ДП $_i$ , а в общей сливной магистрали всех моторов помещен регулятор расхода РР, как это показано на гидросхеме привода редукционного стана (рис.4).

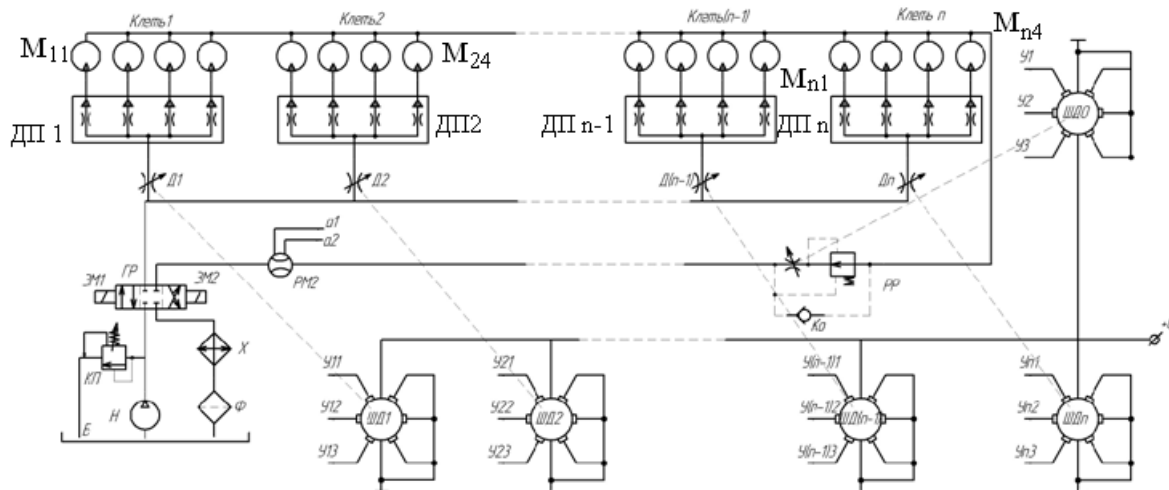


Рис. 4. Схема гидравлическая редукционно-растяжного стана

На входе каждого делителя потока ДП $_i$  установлен управляемый дроссель Д $_i$ , механически связанный с электрическим шаговым двигателем ШД $_i$ . Регулировочный винт дросселя регулятора расхода РР соединен с валом ШД0. Определенная установка этого дросселя стабилизирует общий расход рабочей жидкости в приводе редукционного стана.

Все гидромоторы стана питаются жидкостью высокого давления либо от индивидуальной насосной станции, в состав которой входят: насос Н, фильтр сливной линии Ф, холодильник Х, бак Б и предохранительный клапан КП, либо от насосно-аккумуляторной станции гидравлического пресса. Подача рабочей жидкости в напорную магистраль стана и слив в бак осуществляются гидрораспределителем ГР с электромагнитным управлением (ЭМ1 и ЭМ2). В сливной магистрали между ГР и РР установлен расходомер РМ2, формирующий аналоговый или цифровой сигнал, пропорциональный реальному суммарному расходу рабочей жидкости (с учетом переменных во времени дренажных потерь расхода). В случае использования цеховой НАС напорная и сливные линии подключаются на соответствующие входы гидрораспределителя ГР. Поскольку моторы роliko-лопастного типа имеют конструкцию, предусматривающую возможность реверса, то в гидросхеме на рис.4 предусмотрена установка трехпозиционного ГР, дающего возможность изменять направление вращения валков всех клеток в случае вывода оборудования из аварийного состояния (например, бурение трубы в одной из клеток). При реверсировании стана делители потоков ДП $_i$  работают в режиме суммирования; скорость

обратного вращения каждой клетки определена актуальной настройкой дросселей Д $_i$ ; регулятор расхода РР шунтируется обратным клапаном КО. Реверс осуществляется подачей электропитания на обмотки ЭМ2.

Управление приводами редукционного стана в согласованном с гидравлическим прессом режиме строится по трехэтапной схеме. На первом этапе еще до начала истечения трубы из матрицы, но после начала движения плунжера главного цилиндра, на основе предварительной информации о скорости прессования, поступающей с расходомера РМ1 (рис.5), осуществляется разгон всех клеток стана в соответствии с установками по скоростям, отображающими проектный режим вытяжек по клетям. Расходомер РМ1 установлен в сливной линии ретурных цилиндров ЦР пресса. Настройку по скоростям редукционного стана на первом этапе следует считать достаточно грубой, однако такая настройка рассматривается как предварение регулирования скоростей прокатки.

Сигналом, запускающим систему управления для реализации первого этапа скоростной настройки стана, является потенциал  $d$ , снимаемый с делителя напряжений  $R_{рд}$  после срабатывания реле давления РД. Последнее установлено в напорной магистрали или в корпусе главного цилиндра ГЦ пресса и настроено на давление рабочей жидкости, соответствующее усилию начала распрессовки слитка. Сигнал  $d$  калибруется по уровню напряжения под потенциал логической единицы (например, в соответствии с Международным логическим соглашением).



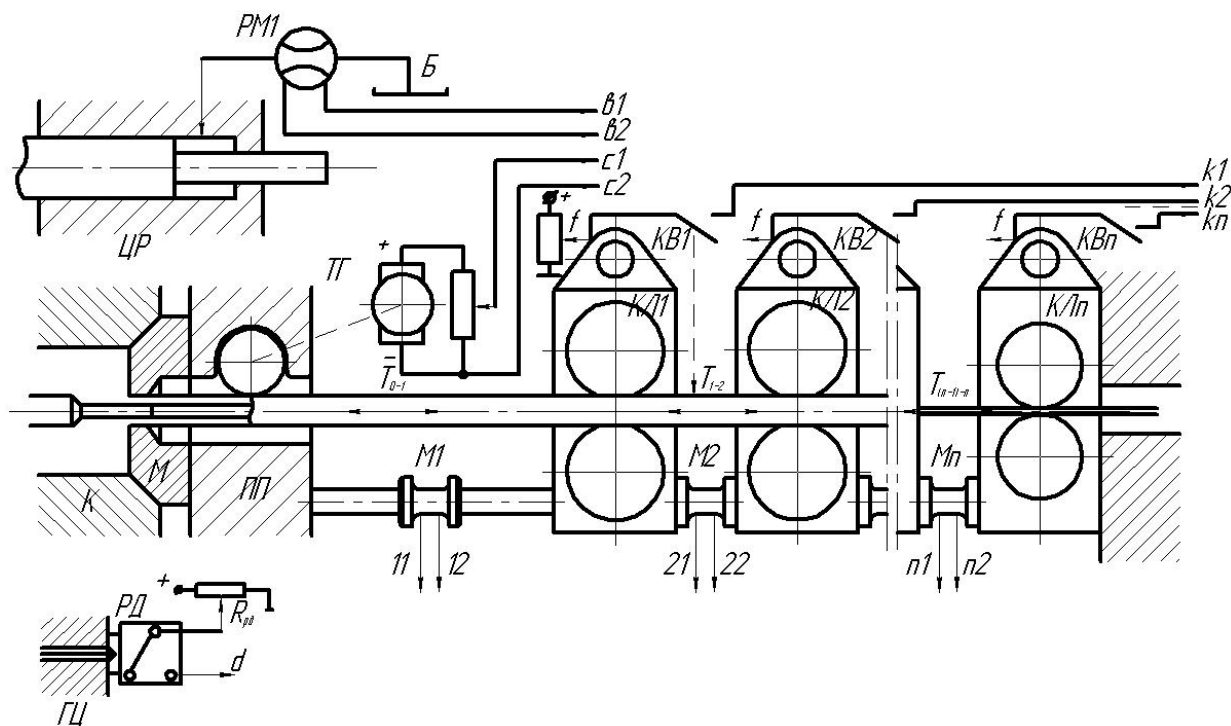


Рис. 5. Система сбора исходной информации с объекта регулирования (пресс-стан)

На втором этапе, технологически соответствующем началу истечения металла из матрицы, осуществляется точная установка скоростей вращения валков клеток в соответствии с установками по скоростям прокатки. Запускающим сигналом является откалиброванная под логическую единицу разность потенциалов  $C1-C2$ , снимаемая с делителя напряжений, включенного на тахогенератор ТГ. Последнему придается вращение с частотой, пропорциональной скорости истечения трубы из матрицы. На схеме рис.5 в качестве примера показан обкатной ролик, прижимаемый к движущейся прессуемой трубе. Предполагается, что такой или подобный датчик скорости монтируется в корпусе передней поперечины ПП пресса в непосредственной близости от матрицы М.

Третий этап регулирования скоростного режима редукционного стана начинается с момента входа трубы в первую клетку, что идентифицируется срабатыванием конечного выключателя КВ1 (например, датчик Холла, смонтированный в проводковом устройстве). На этом этапе осуществляется настройка стана по натяжениям. Информация о натяжении трубы между прессом и первой клетью снимается с мессдозы М1. Сигнал о натяжении (11-12) сравнивается с установкой по натяжению  $T0-1$  и устранением рассогласования за счет регулировки дросселя Д1 устанавливается

предписанное натяжение прессуемой трубы. Конечные выключатели КВ $i$  регистрируют вход труб в соответствующие  $i$ -е клетки, а информация с мессдоз М $i$  используется для отработки заданных межклетевых натяжений трубы.

Вся информация, поступающая с датчиков объекта управления, преобразуется в двоичный код разрядности  $m$  посредством АЦП. Следовательно, все уставки по скорости прокатки и натяжениям трубы после пресса и между клетями также представляются кодами той же разрядности. В качестве примера на рис.6 показана возможная и очень простая конфигурация блока уставок. Используемые регистры условно приняты однобайтовыми.

Регистры  $V_i$  используются для хранения информации о регламентированном технологией скоростном режиме прокатки. В клетях с гидроприводными валками скорость вращения отождествляется с расходом рабочей жидкости, поэтому регистры  $V_i$  хранят информацию о соотношениях расходов в смежных клетях. Эти соотношения равны вытяжкам в соответствующих клетях. При записи двоичных кодов разрядности  $m$  в регистры  $V_i$  устанавливается соответствие между вытяжками  $\lambda_i$  в клетях стана и их двоичным представлением.

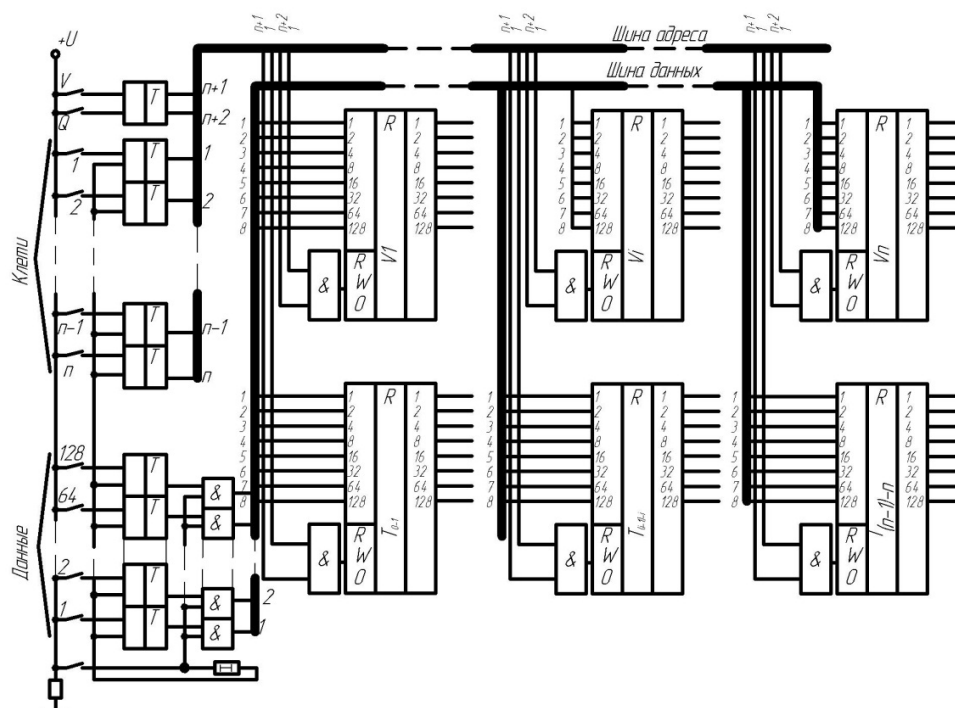


Рис. 6. Блок ввода уставок по скорости прокатки в  $n$  клетях ( $V_i$ ) и по межклетевым натяжениям  $T_{(i-1)-i}$

Если  $Q$  – общий расход рабочей жидкости при работе всех клеток стана с предписанными вытяжками, то  $Q = \sum_{i=1}^n q_i$ , где  $n$  – количество клеток в стане,  $q_i$  – расход рабочей жидкости в  $i$ -й клетке. Можно записать

$$\frac{q_1}{Q} + \frac{q_1 \lambda_2}{Q} + \dots + \frac{q_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_i}{Q} + \dots + \frac{q_1 \prod_{j=2}^n \lambda_j}{Q} = 1$$

Соответствие двоичных кодов уставки по скорости прокатки расходам рабочей жидкости в гидромоторах клеток устанавливается

соотношением  $\frac{q_i}{Q} = \frac{K_i^V}{K}$ , где  $K = 2^m$ ,  $m$  – разрядность кодов представления информации (в примере на рис.6  $m = 8$ );  $K_i^V$  – двоичный код расхода жидкости в  $i$ -й клетке.

$$K_1^V = \frac{K}{1 + \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \dots + \prod_{j=2}^n \lambda_j};$$

$$K_i^V = \frac{K - \sum_{j=0}^{i-1} K_j^V}{1 + \lambda_{i+1} + \dots + \prod_{j=i+1}^n \lambda_j}, \quad \text{при}$$

$K_0 = 0$ .

Поскольку при проектировании технологии редукционной прокатки определяются площади

сечения трубы  $F_i$  после каждого прохода и сопротивление металла деформации  $\sigma_{si}$ , определяется максимально допустимое межклетевое натяжение трубы между  $(i-1)$ -й и  $i$ -й клетями  $T_{(i-1)-i}^{\max}$  и между прессом и первой клетью  $T_{0-1}^{\max}$ .

$T_{(i-1)-1}^{\max} = F_{i-1} \sigma_{i-1}$ ;  $T_{0-1}^{\max} = F_0 \sigma_{s0}$ , где  $F_0$  – площадь сечения прессованной трубы,  $\sigma_{s0}$  – сопротивление деформации металла горячепрессованной трубы с учетом динамического разупрочнения.

Относительные напряжения натяжений  $Z_i$  назначаются из технологических соображений. В таком случае кодировка межклетевых натяжений при формировании уставки в регистрах  $T_{(i-1)-i}$

определяется из соотношения  $\frac{T_{(i-1)-i}}{T_{(i-1)-i}^{\max}} = \frac{K_i^T}{2^m}$ , где

$K_i^T$  – двоичный код, помещаемый в регистр  $T_{(i-1)-i}$ .

На первых двух этапах регулирования скоростного режима осуществляется управление общим по стану расходом рабочей жидкости посредством регулятора расхода РР (рис.4) и шагового мотора ШД0. Система работает по отклонению регулируемого параметра, в качестве которого рассматривается различие нормированных сигналов расходомеров РМ1 и

PM2. Корректировка скоростей всех клеток на втором этапе выполняется по сигналу, снимаемому с тахогенератора ТГ. При этом скорость первой клетки в соответствии с уставкой устанавливается регулированием расхода  $Q$ , а всех остальных клеток – регулированием  $q_i$ , посредством дросселей Ді и ШДі. Поскольку уставка по скорости представлена кодом, отображающим отношение частного расхода  $q_i$  к общему  $Q$ , то отработка заданной скорости осуществляется вне зависимости от изменяющегося общего расхода рабочей жидкости.

В соответствии с принятой разрядностью  $m$  регистров блока уставок (рис.6) используется АЦП той же разрядности. Формирование сопоставимых кодов сигналов датчиков выполняется настройкой входных каскадов АЦП, которые в простейшем случае могут быть представлены делителем напряжений. Например, расходомер PM1 преобразует величину расхода жидкости в линии слива одного из ретурных цилиндров  $Q_p$  в электрическое напряжение  $U_{PM1}$ , пропорциональное расходу, т.е.

$$Q_p^{\max} \Leftrightarrow U_{PM1}^{\max}; \text{ если } Q_p=0, \text{ то } U_{PM1}=0.$$

Максимально возможный расход рабочей жидкости, вытесняемой из ретурного цилиндра

$$Q_p^{\max}, \text{ определяется конструкцией пресса и скоростными условиями прессования} - \\ Q_p^{\max} = V_p^{\max} F_p, \text{ где } V_p^{\max} = V_{пр}^{\max} \frac{F_{г\text{л}}}{F_{\Sigma p}} -$$

максимальная скорость перемещения плунжера ретурного цилиндра;  $F_{г\text{л}}$  - площадь сечения плунжера главного цилиндра пресса;  $F_{\Sigma p}$  - суммарная площадь сечений плунжеров ретурных

цилиндров;  $V_{пр}^{\max} = \frac{Q_{г\text{л}}^{\max}}{F_{г\text{л}}}$  - максимальная

скорость прессования;  $Q_{г\text{л}}^{\max}$  - максимально возможный расход жидкости при прессовании.

Условием подключения расходомера PM1 к АЦП является  $U_{PM1}^{\max} \leq U_{CAD}^{\max}$ , где  $U_{CAD}^{\max}$  - максимальное входное напряжение АЦП. Соответствие максимальных напряжений PM1 и АЦП устанавливается делителем напряжений (рис.7).

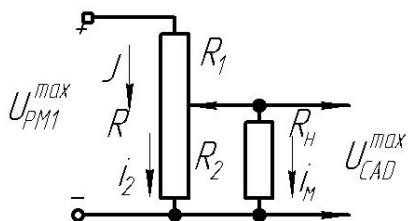


Рис. 7. Схема делителя напряжений

$$U_{PM1}^{\max} = IR_1 + I \frac{R_2 R_H}{R_2 + R_H};$$

$$U_{CAD}^{\max} = i_H R_H = \frac{IR_H R_2}{R_2 + R_H};$$

$$\frac{U_{CAD}^{\max}}{U_{PM1}^{\max}} = K = \frac{1}{\frac{R}{R_H} - \frac{R_2}{R_H} \cdot \frac{R}{R_2}}.$$

$$\text{Если принять } R_2 = R_H, \text{ то } \frac{R_2}{R} = \frac{2K}{1+K};$$

$$R = \frac{R_H(1+K)}{2K}.$$

Аналогичным образом подключаются к АЦП остальные датчики.

Возможный вариант схемы корректировки расходов рабочей жидкости в  $i$ -й клетке при отработке скоростного режима и режима межклетевых натяжений в соответствии с уставками, помещенными в регистры  $Vi$  и  $T(i-1)-i$ , показан на рис.8.

Пусковая часть является общей для всех клеток и обеспечивает счетный режим работы счетчиков  $Ci$  и их обнуление в момент запуска. До момента входа трубы в  $i$ -ю клетку работает верхняя часть схемы, где осуществляется сравнение кодов счетчика  $Ci$  и регистра  $Vi$ . При наличии рассогласования того или иного знака подключается контроллер шагового двигателя ШДі, направление вращения которого установлено таким образом, что отверстие дросселя Ді растёт до тех пор, пока код  $Vi$  больше кода  $Ci$ . В момент совпадения кодов на вход «Пуск» контроллера подается «0» и регулирование дросселя прекращается. В этот момент дроссель остается в позиции, соответствующей заданному технологией отношению  $q_i/Q$ . Изменение скорости вращения валков клетки с этого момента возможно только за счет изменения  $Q$ . При отключении схемы ключом «Стоп» пусковой триггер Т обнуляет выходную шину регистра  $Vi$  и ШДі отработывает дроссель в исходную позицию (перекрывается дроссельное отверстие).

При входе трубы в  $i$ -ю клетку стана конечный выключатель  $Ki$  выдает сигнал на вход считывания регистра  $T(i-1)-i$ , а сигнал  $i1-i2$  с мессдозы  $Mi$ , установленной между  $(i-1)$ -й и  $i$ -й клетками поступает на вход АЦП CAD  $Mi$ . Схема сравнения СС  $T(i-1)-i$  вновь запускает в соответствующем направлении ШДі для отработки заданного межклетевого натяжения. Момент совпадения кодов регистров  $Mi$  и  $T(i-1)-i$  индуцируется светодиодом СДі.

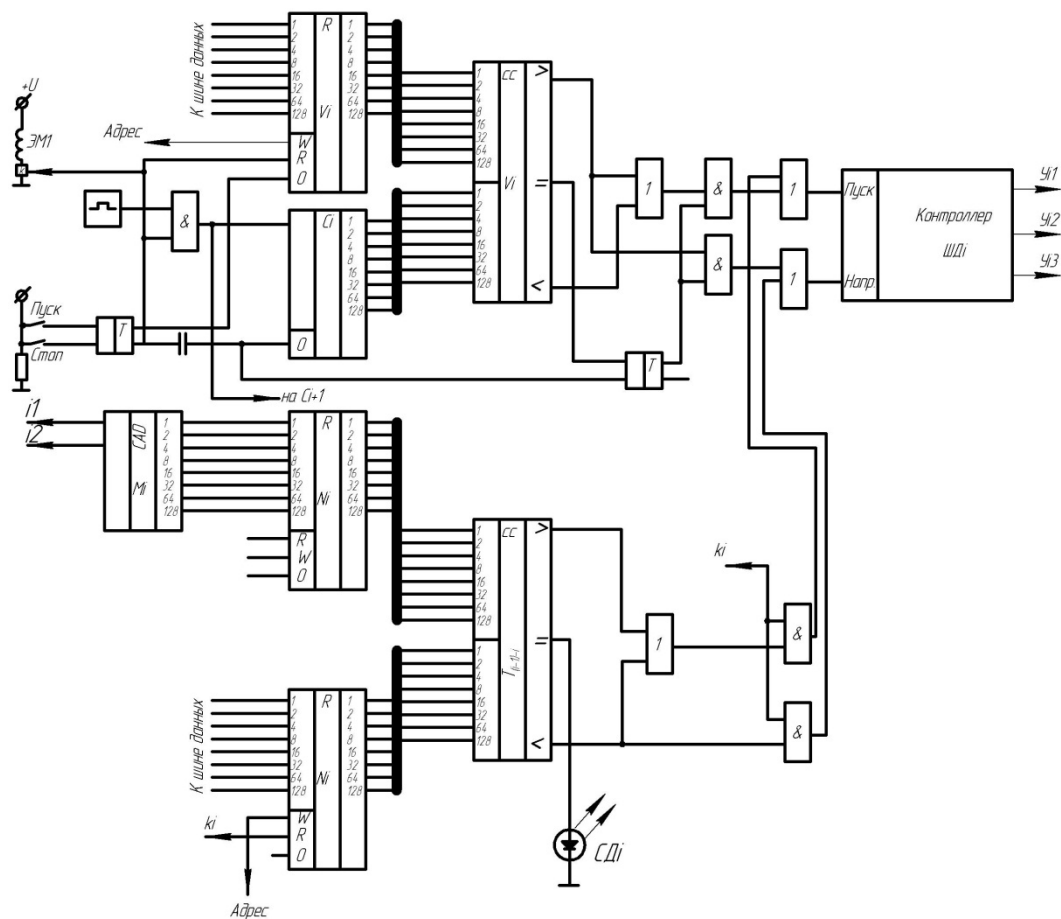


Рис. 8. Вариант схемы корректировки расхода рабочей жидкости  $i$ -й клетки по уставкам скорости и межклетевого натяжения

Контроллеры шаговых двигателей имеют идентичную структуру (рис.9) и снабжены

собственным генератором счетных импульсов с частотой совпадающей с генератором счетчиков  $C_i$ .

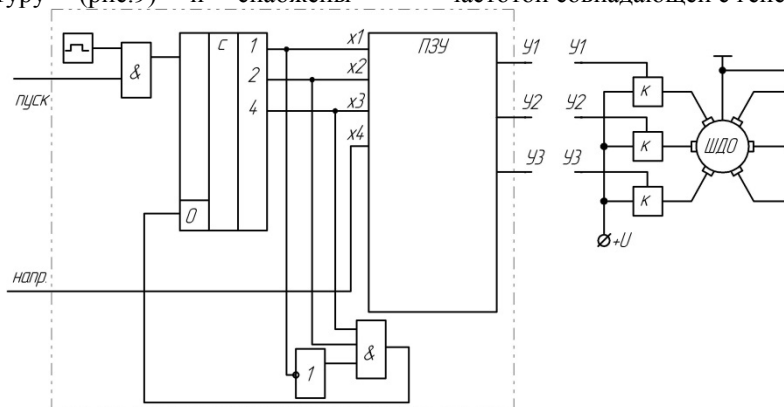


Рис. 9. Схема контроллера шагового двигателя с шеститактовой коммуникацией обмоток

ПЗУ контроллера прошивается в соответствии с системой уравнений

$$\begin{cases} y1 = \bar{x}1 \cdot \bar{x}2 \cdot \bar{x}3 + x1 \cdot \bar{x}2 \cdot x4 + \bar{x}2 \cdot x3 \cdot \bar{x}4 \\ y2 = \bar{x}1 \cdot \bar{x}2 \cdot x3 \cdot \bar{x}4 + x1 \cdot \bar{x}2 \cdot \bar{x}3 \cdot x4 + \bar{x}1 \cdot x2 \\ y3 = x1 \cdot \bar{x}2 \cdot \bar{x}4 + \bar{x}1 \cdot \bar{x}2 \cdot x4 + \bar{x}1 \cdot x2 \cdot \bar{x}3 \cdot x4 + \bar{x}1 \cdot x2 \cdot x3 \cdot \bar{x}4 \end{cases}$$

Описанный вариант системы автоматического скоростного согласования процессов прессования трубной заготовки и ее редуционно-растяжной прокатки решает все проблемы прямого

совмещения этих технологических переделов и гарантирует получение горячекатаной трубы с заданной толщиной стенки за счет стабилизации режима межклетевых натяжений. Практическая

реализация данной схемы осуществляется с использованием простой и дешевой элементной базы, или простейшего программируемого серийного контроллера, и доступна специалистам КИП практически любого промышленного предприятия. Принципиально новым элементом алгоритма управления скоростным режимом работы редуционного стана при случайно изменяющейся скорости входа трубы является формирование уставки не по абсолютным значениям скоростей прокатки в каждой клетки, а по величинам отношений частных расходов к общему по стану расходу рабочей жидкости.

### **Заключение**

К принципиальным технологическим и конструктивным особенностям, определяющим эффективность описанной разработки, можно отнести следующие:

- плавильный агрегат с индукционным вращателем дает возможность выплавки сплавов сложного химического состава и получать равномерное распределение легирующих элементов и температуры по объему плавильной ванны;
- литая полая заготовка формируется намораживанием при закрытой подаче расплава, предотвращающей окисление металла; кристаллизация при циклическом движении расплава вдоль фронта кристаллизации обеспечивает мелкозернистую структуру и полное подавление ликвации легирующих элементов;
- предусматриваемая механическая обработка гарантирует коаксиальность прессовой заготовки, поскольку остающаяся в заготовке труба-кристаллизатор при токарной обработке может быть использована для зацентровки слитка;
- способ намораживания позволяет расширить сортамент выпускаемых труб за счет постановки на производство биметаллических труб и профилей;
- холодное волочение заменяется горячей прокаткой практически до готового размера, что значительно снижает энерго- трудозатраты, повышает производительность, сокращает производственные площади и количество обслуживающего персонала;
- горячая прокатка осуществляется с литейного нагрева, следовательно, не дополнительных затрат энергии на промежуточный нагрев;
- в предлагаемой технологии реализуется процесс прессования труб с передним натяжением, что повышает износостойкость прессового инструмента и снижает силу прессования;

- управляемые автоматически межклетевые натяжения обеспечивают возможность регулирования толщины стенки трубы в процессе редуционной прокатки и за счет этого увеличивать типоразмерный ряд производимых труб без переналадок стана;

- применение индивидуального гидропривода валков клеток устраняет асимметрию прокатки и снижает давлением на проводковые устройства стана, способствуя их износостойкости;

- горячая редуционная прокатка позволяет обрабатывать трубы практически из любых деформируемых металлов и сплавов; следовательно, при изготовлении труб из малопластичных сплавов, требующих при холодной обработке промежуточные отжиги, исключается промежуточная термообработка, требующая значительных энергетических затрат.

Перевод производства труб из большинства сплавов меди с волочения и ХПТ на редуционную прокатку высвободит существующее волочильное и прокатное оборудование предприятия, а также позволит расширить как марочный, так и типоразмерный сортамент труб.

### **Библиографический список**

1. Данилов Ф.А., Глейберг А.З., Балакин В.Г. Горячая прокатка труб. М.: Металлургиздат, 1962. 502с.
2. Теория редуцирования труб /Ериклинцев В.В., Фридман Д.С., Блинов Ю.И., и др. Свердловск: Средне-Уральское книжное издательство, 1970. 232с.
3. Швейкин В.В. Технология холодной прокатки и редуцирования труб. Свердловск: УПИ, 1983. 100с.
4. Потапов И.Н., Коликов А.П., Друян В.М. Теория трубного производства. М.: Металлургия, 1991. 424с.
5. Сахно Ю.А. Многопоточные гидравлические делители. М.: Машиностроение, 1988. 160 с.
6. Зюзин В.И. Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. Челябинск: Металл, 1993. 368 с.
7. PIC-микроконтроллеры. Практика применения. М.: Изд. ДМК Пресс, 2004. 272 с.